



# 体育运动中的意识与无意识本体感觉

冯洁<sup>1</sup>,任杰<sup>2\*</sup>

**摘要:** 本体感觉在体育运动中起极其重要的作用,而以往的研究对无意识本体感觉有所忽略。对意识和无意识本体感觉的神经机制、功能作用、评价方法、影响因素与训练方法做了较全面的综述。首先,意识和无意识本体感觉在其中枢机制、对刺激的感知及应答方式上存在区别;其次,总结了经典的本体感觉评价方法:感觉阈限测量法、关节角度重建法、力量匹配法、视觉模型法、主动运动区分测试、平衡能力测试和体感诱发电位测量法,其中后面两种方法可以用于评价无意识本体感觉。第三,总结了影响本体感觉敏锐性的年龄、损伤和疲劳、运动经历等因素;最后,在如何提高本体感觉方面,主动运动训练、被动运动训练、本体感觉刺激训练等可以提高意识性本体感觉,本体感觉神经肌肉促进法和扰动训练等可以改善无意识本体感觉。本体感觉还有待更多的研究,尤其是以高水平运动员为对象的研究。

**关键词:** 体育运动;本体感觉;无意识;功能;评价;训练

中图分类号:G804.5 文献标志码:A 文章编号:1006-1207(2017)04-0061-07

DOI:10.12064/ssr.20170410

## Conscious and Unconscious Proprioception in Sport

FENG Jie<sup>1</sup>, REN Jie<sup>2\*</sup>

(1.School of Kinesiology, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China; 2.China Table Tennis College, Shanghai University of Sport, Shanghai 200438, China)

**Abstract:** Proprioception is very important in sport, but the previous studies did not pay enough attention to unconscious proprioception. The paper sums up comprehensively the neural mechanism, function, evaluation methods, influence factors and training methods of conscious and unconscious proprioception. First, there is a difference between conscious proprioception and unconscious proprioception in central mechanism and the perception and response to stimulus. Secondly, the paper summarizes some classical evaluation methods for proprioception, i.e., sensory threshold measurement, joint angle reconstruction, power matching test, visual model test, active movement differentiation test, balance ability test and somatosensory evoked potential measurement. The last two methods can be used in evaluating unconscious proprioception. Thirdly, it lists the factors of age, injury and fatigue, exercise experience, which can affect proprioceptive sensitivity. In conclusion, active training, passive training and proprioceptive stimulation training can improve conscious proprioception. And proprioceptive neuromuscular promotion and perturbation training can improve unconscious proprioception. More studies are expected on proprioception, especially the researches on the proprioception of the elite athletes.

**Key Words:** sport; proprioception; unconscious; function; evaluation; training

本体感觉是个体对自身肢体位置和运动信息的感知,主要包括 4 方面的内容:对肢体静态位置的感知、对肢体运动的感知、对肢体受力的感知,以及对阈下刺激的本体感受性反射<sup>[1,2]</sup>。前三者属于意识性

本体感觉,其信息加工中枢位于大脑皮层,后者属于无意识本体感觉,其信息加工位于小脑及脊髓。意识性本体感觉主要感知可觉察的躯体的空间位置和运动信息,无意识本体感觉主要以反射的形式对阈下

收稿日期:2017-06-23

基金项目:国家体育总局课题(2015B064)

第一作者简介:冯洁,男,副研究员。主要研究方向:应用心理学。E-mail: fengjiesus@163.com。

\* 通讯作者简介:任杰,男,教授。主要研究方向:运动心理学。E-mail: renjie@sus.edu.cn。

作者单位:1.上海体育学院运动科学学院,上海 200438;2.上海体育学院中国乒乓球学院,上海 2004381。



刺激产生快速精细的修正,两者与人体的姿势协调、运动技能学习、运动功能改善和损伤预防等密切相关。探讨体育运动中的意识和无意识本体感觉,不仅可以帮助运动员了解自身的本体感觉机能,帮助他们通过提高本体感觉从而改善运动技能,还能为运动员的科学训练提供参考。

基于本体感觉的重要性,目前国内外已对其展开了广泛的研究并收获了丰富的成果,但研究者多从康复和医学的角度出发,而忽略了本体感觉在体育运动中的重要作用。同时,研究主要针对意识性本体感觉,而忽略了非意识性本体感觉的重要作用及其与意识性本体感觉的不同之处。由于意识性和非意识性本体感觉在神经机制、功能作用、评价方法、影响因素和训练方法等方面存在不同,本研究拟从体育运动的角度出发,对以上问题进行探究,并对未来的研究方向进行展望。

### 1 神经机制

本体感受器遍布全身,大致可以分为前庭系统(半规管、椭圆囊斑、球囊斑)、肌肉感受器(肌梭、高尔基腱器官)、关节感受器和皮肤感受器(触觉小体、环层小体、鲁菲尼小体、梅克尔盘、Krause 终球)等 4 大类<sup>[3]</sup>。不同功能的感受器相互作用,协调合作,整合形成精确的本体感觉<sup>[4]</sup>。

意识性本体感觉形成的最根本的基础结构是大脑和感受器间的神经环路。从解剖的角度来讲,本体感觉的传导通路由 3 级神经元组成:第 1 级是脊神经节细胞,其周围突位于肌肉、关节、皮肤等处的本体感觉感受器,中枢突形成薄束和楔束,止于延髓的薄束核和楔束核;由薄束核和楔束核发出纤维后交叉上升,形成内侧丘系止于背侧丘脑的腹后外侧核;腹后外侧核发出纤维后经内囊后肢投射至大脑皮层中央后回的中、上部和中央旁小叶后部,引起意识性本体感觉(见图 1)。

无意识本体感觉传导通路由 2 级神经元组成:第 1 级是脊神经节细胞,其周围突位于肌肉、关节、皮肤等处的本体感觉感受器,其中枢突经脊神经后根内侧进入脊髓,止于胸核和腰骶膨大第 V~VII 层外侧部;由胸核和腰骶膨大外侧部发出 2 级纤维,上行进入小脑皮质,形成无意识本体感觉。

### 2 功能

在体育运动中,意识性本体感觉在提供反馈信息方面担任着重要角色,具体如通过肌梭、腱器官等感受躯体部位在空间中的绝对位置和位置变化,将

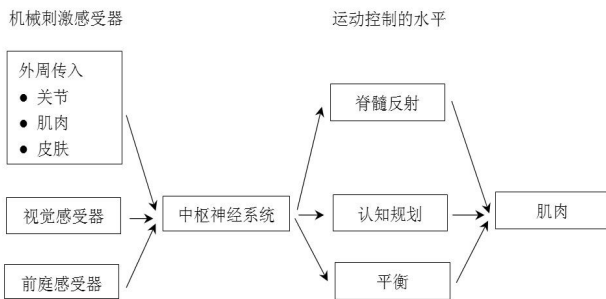


图 1 本体感觉神经肌肉系统控制通路 (据 Lephart 等<sup>[5]</sup>修改)

Figure 1 Proprioceptive Neuromuscular Control Pathways (According to Lephart)

信息传输至大脑以控制和协调肌肉力量,调整运动姿势<sup>[6]</sup>。除此之外,本体感觉也提供前馈信息,即中枢神经提前将运动指令传达至肌肉,使之提前激活以做好接收反馈信息的准备<sup>[7]</sup>,如一项研究发现,本体感觉在体育运动中的重要性就在于个体能够将预期会产生的感觉和实际产生的感觉进行比较<sup>[8]</sup>。

无意识本体感觉在运动控制中的作用也举足轻重,通常表现为较低级的反射性应答,主要包括 M1 应答和 M2 应答。M1 应答的潜伏期为 30~50 ms,主要负责对由较小的拉伸所引起的肌肉收缩进行修正,与肢体晃动、意外受伤等有关;M2 应答的潜伏期为 50~80 ms,产生的肌电波幅比 M1 应答更大,持续时间更长,对动作的补偿作用也更大,并具有更大的可变性<sup>[3]</sup>。由于无意识本体感觉保护性反射弧的启动远远快于疼痛感受器,因此在对肌肉的保护和急性运动损伤的预防中扮演着重要角色<sup>[9]</sup>。同时,无意识本体感觉还能促进运动员动作技能的学习和提高<sup>[10]</sup>。除此之外,在运动中,很多快速动作的执行和控制都是非意识的,即未经中枢皮层的意识加工,如摔跤运动员的快速重心调整、乒乓球运动员击球时根据球的旋转快速改变用力方向等。

### 3 评价方法

#### 3.1 意识性本体感觉的评价

##### 3.1.1 感觉阈限测量法

通过仪器使受试者的身体部位被动移动,当受试者觉察到躯体位置发生变化时做出反应并报告移动的方向,测量受试者躯体部位起始位置和能够感受到运动时的关节角度之间的差异。在测试过程中,与测试没有直接关系的感受需要被限制,比如让受试者蒙上眼睛、戴上耳机、固定其他身体部位等。这种方法具有较高的精确性和信度,但也由于对其他



感觉的限制导致测试的生态效度较低,且其他因素如仪器移动躯体部位的速度对受试者的判断结果也有显著影响,有研究发现在移动速度较小时受试者感觉阈限较高<sup>[14]</sup>。

### 3.1.2 关节角度重建法

通过外力将受试者的某身体部位移至某角度,或让受试者主动将肢臂移至某角度,以此作为参照角度,停留一段时间后,通过受试者主动将肢臂移动或由仪器引导至先前的角度时停止,即重建该关节角度,测量参照角度和重建角度之间的差异。关节角度重建法在本体感觉的测量中得到了广泛的应用,但在被动定位主动复位和主动定位被动复位这两种测试条件中,由于定位和复位时涉及的感觉系统不同,导致该方法的测试效度有一定局限性<sup>[12]</sup>。同时,在角度重建尤其是在对侧肢体角度重建过程中,测试任务涉及记忆过程和大脑半球间的沟通,因此被试的认知功能也会对测试结果产生影响<sup>[13]</sup>。

### 3.1.3 力量匹配法

该方法类似于关节重建法,一般采用主动运动的形式,要求受试者先产生特定大小的目标力量,随后要求被试在没有反馈的情况下用同侧肢体或对侧肢体重复产生这一力量,根据目标力量和重建力量之间的误差评估本体感觉敏锐性。力量匹配法是测量力量本体感觉最常采用的方法,在研究中得到了广泛的应用<sup>[14]</sup>,但有研究提出,在对侧力量匹配任务中,优势手与非优势手的力量配对重现时,其误差较大<sup>[15]</sup>。

### 3.1.4 视觉模型法

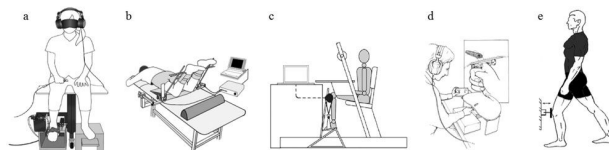
让受试者通过观察关节模型的角度,之后通过

主动或被动运动将自身的关节移动至该参照角度,或者要求受试者在进行主动或被动运动定位后,在关节模型中实现定位角度,测量模型角度和受试者关节角度之间的差异,用以评价本体感觉敏锐性。视觉模型法有较好的信度和效度,已广泛应用于健康人和患者的本体感觉测量<sup>[16]</sup>。但该测试任务涉及视觉信息与本体感觉信息之间的转换能力,因此测试结果并不能纯粹地反映本体感觉功能,也不适用于视觉受损的被试。

### 3.1.5 主动运动区分测试

将关节的运动角度划分为几个等级,在实验中,先让受试者感受并熟悉每个等级对应的关节角度,在测试阶段要求受试者将肢体(关节)旋转至某角度并判断对应的等级。这种方法不完全消除其他感觉,且不限其他部位,具有较高的生态效度。但也由于测试过程中其他部位不受限制,因此不能保证具体动作是使用测试规定的部位完成的,如当测试要求移动手臂时,受试者可能会通过移动踝关节来改变身体重心或移动肩关节来完成要求<sup>[17]</sup>。

意识性本体感觉不同评价方式的测试仪器详见图2,意识性本体感觉不同评价方式的对比详见表1。



注:a,感觉阈限测量法<sup>[18]</sup>;b,关节角度重建法<sup>[19]</sup>;c,力量匹配法<sup>[14]</sup>;d,视觉模型法<sup>[20]</sup>;e,主动运动区分测试<sup>[21]</sup>。

图2 意识性本体感觉不同评价方式的测试仪器  
Figure 2 Test Instrument for the Different Evaluation Methods of Conscious Proprioception

表1 意识性本体感觉不同评价方式的对比(据 Han 等<sup>[12]</sup>修改)

Table I Comparison of Different Conscious Proprioception Tests

	感觉阈限测量法	关节角度重建法	力量匹配法	视觉模型法	主动运动区分测试
运动类型	被动	被动/主动	主动	被动/主动	主动
运动速度	很慢	慢/正常	正常	慢/正常	正常
动作信息	运动觉	位置觉	力量觉	位置觉	位置觉,运动觉
视觉	限制	限制	正常	正常	正常
听觉	限制	正常	正常	正常	正常
对注意的要求	很高	高	高	高	高
对记忆的要求	很低	高	高	高	很高
测量的数据	起始与报告角度之差	目标与实际角度之差	目标与实际力量之差	目标与实际角度之差	AUC 分数
数据单位	度	度	牛顿	度	AUC 分数

## 3.2 无意识本体感觉的评价

### 3.2.1 平衡能力测试

对无意识本体感觉的评价往往采用微弱刺激下

个体的应答反应来评价。比如,人体直立姿势的轻震动诱发无意识的反射调节机制<sup>[22]</sup>。因此,平衡能力测试常被用来评价无意识本体感觉能力,包括静态



平衡测试和动态平衡测试。静态平衡测试要求受试者静止直立于一个平台上,尽量保持身体稳定,对比受试者在睁眼或闭眼条件下的肌电和身体动摇情况,测定人体的静态平衡值。借助数学工具分离出观察指标中的开环和闭环控制成分,推算本体感觉的敏锐性<sup>[23]</sup>。在动态平衡测试中,受试者站立于测试平台上,要求受试者在测试平台前后或左右移动时尽量保持身体平衡,根据皮肤表面肌电、躯体摆动和姿势反应,测定其动态平衡值。在体育运动领域,平衡能力测试已广泛应用于运动员运动性损伤的预测和鉴定<sup>[24]</sup>。

### 3.2.2 体感诱发电位测量法

体感诱发电位测量法通过对人体局部施加机械刺激、电刺激或其他刺激形式,测量受试者产生的皮肤表面肌电和大脑皮质上电位波幅和潜伏期的变化,反映本体感觉的反射回路,比如H反射评价<sup>[25]</sup>。体感诱发电位测量法能够反映脊髓和中枢神经系统功能的完整性,为了解本体感觉通路提供了生理解剖方面独特的手段,具有较高的临床应用价值。体感诱发电位包括短潜伏期电位、中潜伏期电位和长潜伏期电位。对这类肌电图的分析已被广泛用于评估无意识本体感觉在运动过程中的功能<sup>[26]</sup>。

需要注意的是,平衡能力测试和体感诱发电位测量法能够同时测量意识和无意识本体感觉,在诸多测试指标中,在短潜伏期内产生的肌肉电位反映的是无意识本体感觉,中、长潜伏期电位和外显的躯体反应则反映的是意识性本体感觉。

本体感觉的评估有利于运动员的选材、训练和损伤的预防,在体育运动中十分重要。目前,对于本体感觉的评估,尤其是对无意识本体感觉的评估在运动领域的应用较少。另外,大部分研究都只用一种测试方法来评价本体感觉的敏锐性,然而,不同本体感觉测量方法体现的是本体感觉不同方面的功能和属性,且不同测试方法测得的结果之间没有显著的相关性,因此一种测试方法并不能全面地体现个体的本体感觉功能<sup>[27]</sup>。本体感觉测试方法的选择取决于具体情形或受试者的能力,各种测试方法不具选择性,不能相互代替。即使采用同一种测试方法,在同一躯体部位的测试中,不同角度指标的测试结果也存在差异<sup>[28]</sup>,因此要根据具体情况选择测试方法和角度指标。

## 4 影响因素

### 4.1 年龄

随着年龄增长,鲁菲尼小体、帕西尼小体和高尔基腱器官等本体感受器的数量减少,并在形态上

发生变化,使得本体感觉外周输入减少,从而导致敏锐性呈现下降的趋势<sup>[29]</sup>。研究发现,本体感觉敏锐性与年龄显著相关,年轻人的本体感觉较好,中年人其次,老年人的本体感觉敏锐性最低<sup>[30]</sup>。因此,对于运动员来说,在有限的运动生涯期内,要积极进行本体感觉训练,以缓解年龄的增长带来的本体感觉敏锐性下降。但也有研究同时测试了受试者的本体感觉和感觉运动任务绩效,结果发现,个体的运动表现独立于与年龄相关的本体感觉敏锐性下降<sup>[31]</sup>。

### 4.2 损伤和疲劳

运动损伤与本体感觉敏锐性下降有密切的关系。如一项以棒球运动员为对象的研究发现,投手患侧肩关节的本体感觉敏锐性显著低于健侧<sup>[32]</sup>。运动损伤会导致本体感觉敏锐性下降,同时,本体感觉敏锐性下降会增加运动损伤的风险,两者形成恶性循环。其原因可能与无意识本体感觉反射对机体的保护作用有关。通常,运动后的肌肉疲劳会导致本体感觉敏锐性的降低,包括力觉和位置觉<sup>[33]</sup>。肌肉疲劳后,为维持正常运动,个体必须付出更多的努力,从而增加损伤发生的几率<sup>[34]</sup>。如一项对于高水平足球运动员的研究发现,运动员的扭伤几率在比赛的最后15 min较高,反映了比赛最后时期疲劳的影响<sup>[35]</sup>。因此,运动员不仅要避免因过度运动导致的肌肉疲劳,预防运动损伤,更要做好肌肉疲劳和损伤后的本体感觉恢复,提高运动表现。

### 4.3 运动经历

与普通人相比,高水平运动员的本体感觉敏锐性更高,且其与运动水平显著相关,即运动水平越高,其本体感觉敏锐性越高<sup>[21]</sup>。同时,不同体育项目的运动员本体感觉敏锐性也不同,如跆拳道运动员表现出更敏锐的膝关节本体感觉<sup>[36]</sup>;冰球运动员和芭蕾舞演员表现出更敏锐的踝关节本体感觉<sup>[37]</sup>;乒乓球运动员的上肢本体感觉更敏锐<sup>[38]</sup>。显然,长期的专项训练使得运动员在特定肢体关节上的本体感觉优于其他人。而且也有研究显示,短期的运动经历也能提高本体感觉的敏锐性,如12周的舞蹈课程可以有效地改善膝关节和上肢的位置觉<sup>[39]</sup>。

## 5 训练

### 5.1 意识性本体感觉的训练

#### 5.1.1 主动运动训练

主动运动训练涉及人体单个、多个关节或全身的主动运动,包括单个关节主动运动训练、多个关节



主动运动训练和全身的平衡训练。比如,能改善运动员踝关节本体感觉的晃动板训练<sup>[40]</sup>,训练手指本体感觉的手指主动运动任务<sup>[41]</sup>。运动员常用的平衡训练包括单腿站立训练、双腿站立训练、在不平坦的地面上行走和跳跃等。除此之外,还可以借助运动器械对运动员进行结合专项特点的本体感觉训练,如让手球运动员在平衡板上进行传球训练<sup>[42]</sup>。Aman等人认为主动运动训练对个体本体感觉和运动功能的改善效果好于其他训练方式,达到训练前的37%<sup>[43]</sup>。

### 5.1.2 被动运动训练

被动运动训练涉及人体单个或多个关节的被动运动,借助一些被动运动仪器完成。一项研究发现,快速连续的膝关节被动运动训练能够显著地提高膝关节本体感觉敏锐性<sup>[44]</sup>。不仅如此,另有研究发现,被动运动训练在提高受训部位的本体感觉以外,还能促进受试者运动技能的学习<sup>[45]</sup>。被动运动训练存在的问题是,很难排除受试者在训练过程中进行了主动运动的可能性。

### 5.1.3 本体感觉刺激训练

本体感觉刺激训练是指将较小负荷的刺激施加于人体单个关节或全身,以刺激肌肉的本体感受器,增强感觉输入,具体刺激形式包括振动刺激、热刺激、磁刺激、针刺和电刺激等。研究发现,附加振动刺激的本体感觉训练能够显著提高受试者的本体感觉和运动表现<sup>[46]</sup>。除此之外,附加振动刺激还能通过募集更多的运动单位,改善肌肉的力量和协调性<sup>[47]</sup>。

## 5.2 无意识本体感觉的训练

### 5.2.1 本体感觉神经肌肉促进法

本体感觉神经肌肉促进法(PNF法),旨在通过拉伸反复地刺激感知肌肉伸缩的感受器,促进神经肌肉反应和肌肉收缩,改善运动神经的功能。研究发现,受试者在进行PNF法训练后,肌电平均提高了23%以上<sup>[48]</sup>。同时,Kofotolis等人的研究发现,II型肌纤维的肌纤维类型和横截面面积在训练后也发生了变化<sup>[49]</sup>。不仅如此,基于牵张反射和拮抗肌的反射性放松等神经生理机制,在运动后进行PNF法能够快速提高肌肉柔韧性<sup>[50]</sup>。另外,Rees等人的研究发现,进行PNF法训练还能有效提高关节灵活度和肌肉力量<sup>[51]</sup>。

### 5.2.2 扰动训练

扰动训练类似于动态平衡测试,要求被试站立于平台上,平台会随机出现前后或左右方向的移动,要求受试者尽量保持平衡。一项研究使用平衡板对膝关节受损的患者进行扰动训练后发现,受试者的

神经肌肉激活得到恢复,且关节周围的肌肉恢复正常肌电模式<sup>[52]</sup>。另一项研究发现,运动员在发生运动损伤后进行扰动训练,不仅能恢复到损伤前的身体活动水平,还能降低之后运动损伤的风险,且效果持续的时间也很长<sup>[53]</sup>。

上述的几种经典的本体感觉训练方式,能够提高运动员的本体感觉敏锐性,从而在运动中有更好的表现。由于在运动中,视觉、听觉、本体感觉等多种感觉并存,而且个体对视觉的依赖性较高,可能阻碍本体感觉的发展,因此,在训练中对视觉进行一定程度的限制可促进本体感觉的补偿性提高。在体育运动中,本体感觉大都在时间极其紧迫的状态下发挥作用,因此运动员必须具备高度敏锐和准确的无意识本体感觉,这就要求运动员加强对无意识本体感觉的训练。不仅如此,不同运动项目对个体特定部位的本体感觉的准确性和灵敏度有特殊的要求,长期的专项训练形成专项化运动知觉,比如游泳运动员的水感、球类项目运动员的球感等。然而,目前来看,本体感觉的训练方法多以静力性训练为主要手段、以恢复为主要目的,充满了康复和医疗的气息,还未从根本上认识到本体感觉的被动恢复和主动发展在训练方式中的诸多异同,不能完全满足体育运动的要求。因此,创建体育运动中尤其是与运动专项相结合的本体感觉训练方法迫在眉睫。

## 6 总结和展望

意识和无意识本体感觉在体育运动中扮演着重要角色。意识性本体感觉的测量方法主要有感觉阈限测量法、关节角度重建法、力量匹配法、视觉模型法和主动运动区分测试;无意识本体感觉的测量方法主要有平衡能力测试和体感诱发电位测量法。年龄的增长和损伤与疲劳会降低本体感觉敏锐性,长期的运动训练则能提高本体感觉敏锐性。最后,主动运动训练、被动运动训练、本体感觉刺激训练等可以提高意识性本体感觉,无意识本体感觉可以通过本体感觉神经肌肉促进法和扰动训练等得到改善。

目前,对于意识和无意识本体感觉神经机制、功能作用、评价方法和影响因素的研究已经比较成熟。但在训练方面,并没有完善的结合各类运动专项特点的训练方法,尤其是无意识本体感觉的训练方法。很多问题有待于积累更多的研究才能得到进一步解决;不同本体感觉训练方式产生的积极影响维持的时间及迁移效果,运动员较高的本体感觉敏锐性究竟是长期训练的结果还是先天决定的,这些问题在将来的研究中都值得被关注。



参考文献:

- [1] Hagert E. Proprioception of the wrist joint: a review of current concepts and possible implications on the rehabilitation of the wrist[J]. *J. Hand Ther.*, 2010, 23(1):2-17.
- [2] Proske U., Gandevia S. C. The proprioceptive senses: their roles in signaling body shape, body position and movement, and muscle force[J]. *Physiol Rev.*, 2012, 92(4): 1651-1697.
- [3] Schmidt R. A., Lee T. D. Motor control and learning: A behavioral emphasis[M]. 5rd ed. Human Kinetics, 2011.
- [4] Gandevia S. C., Refshauge K. M., Collins D. F. Proprioception: peripheral inputs and perceptual interactions[M] //Sensorimotor control of movement and posture. Springer US, 2002: 61-68.
- [5] Lephart S. M., Henry T. J. The physiological basis for open and closed kinetic chain rehabilitation for the upper extremity[J]. *J. Sport Rehabil.*, 1996, 5(1): 71-87.
- [6] 黎涌明,于洪军,资薇,等.论核心力量及其在竞技体育中的训练——起源·问题·发展[J].*体育科学*,2008, 28(4):19-29.
- [7] Hodges P. W., Richardson C. A. Feedforward contraction of transversus abdominis is not influenced by the direction of arm movement[J]. *Exp. Brain Res.*, 1997, 114(2): 362-370.
- [8] Farrer C., Franck N., Paillard J., et al. The role of proprioception in action recognition[J]. *Conscious Cogn.*, 2003, 12(4):609-619.
- [9] Lephart S. M., Kocher M. S., Fu F. H., et al. Proprioception following anterior cruciate ligament reconstruction[J]. *J. Sport Rehabil.*, 1992, 1(3):188-196.
- [10] Moore M.. Golgi Tendon Organs Neuroscience Update with Relevance to Stretching and Proprioception in Dancers [J]. *J. Dance Med. Sci.*, 2007, 11(3):85-92.
- [11] Refshauge K. M., Chan R., Taylor J. L., et al. Detection of movements imposed on human hip, knee, ankle and toe joints[J]. *J. Physiol.*, 1995, 488(1):231-241.
- [12] Han J., Waddington G., Adams R., et al. Assessing proprioception: a critical review of methods[J]. *J. Sport Health Sci.*, 2016, 5(1):80-90.
- [13] Goble D. J. Proprioceptive acuity assessment via joint position matching: from basic science to general practice [J]. *Phys. Ther.*, 2010, 90(8):1176-1184.
- [14] Kim C. Y., Choi J. D., Kim H. D. No correlation between joint position sense and force sense for measuring ankle proprioception in subjects with healthy and functional ankle instability[J]. *Clin. Bio. mech.*, 2014, 29(9): 977-983.
- [15] Park W. H., Leonard C. T., Li S. Finger force perception during ipsilateral and contralateral force matching tasks [J]. *Exp. Brain Res.*, 2008, 189(3):301-310.
- [16] Smitt M. S., Bird H. A. Measuring and enhancing proprioception in musicians and dancers[J]. *Clin. Rheumatol.*, 2013, 32(4):469-473.
- [17] Krewer C., Van de Winckel A., Elangovan N., et al. Commentary on: "Assessing proprioception: A critical review of methods" by Han et al[J]. *J. Sport Health Sci.*, 2016, 5(1):91-92.
- [18] Yasuda K., Sato Y., Iimura N., et al. Allocation of attentional resources toward a secondary cognitive task leads to compromised ankle proprioceptive performance in healthy young adults[J]. *Rehabil Res. Pract.*, 2014, 2014:7.
- [19] Larsen R., Lund H., Christensen R., et al. Effect of static stretching of quadriceps and hamstring muscles on knee joint position sense[J]. *Br. J. Sports Med.*, 2005, 39(1): 43-46.
- [20] Ferrell W. R., Craske B. Contribution of joint and muscle afferents to position sense at the human proximal interphalangeal joint[J]. *Exp. Physiol.*, 1992, 77(2):331-342.
- [21] Han J., Waddington G., Anson J., et al. Level of competitive success achieved by elite athletes and multi-joint proprioceptive ability[J]. *J. Sci. Med. Sport*, 2015, 18(1): 77-81.
- [22] Jacobs J.V., Horak F. B. Cortical control of postural responses[J]. *J. Neural Transm.*, 2007, 114(10): 1339-1348.
- [23] Collins J. J., De Luca C. J. The effects of visual input on open-loop and closed-loop postural control mechanisms [J]. *Exp. Brain Res.*, 1995, 103(1): 151-163.
- [24] Eils E., Schr?ter R., Schr?der M., et al. Multistation proprioceptive exercise program prevents ankle injuries in basketball[J]. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 2010, 42(11): 2098-2105.
- [25] Gruber M., Taube W., Gollhofer A., et al. Training-specific adaptations of H-and stretch reflexes in human soleus muscle[J]. *J. Mot Behav.*, 2007, 39(1):68-78.
- [26] Caudron S., Langlois L., Nougier V., et al. Attenuation of the evoked responses with repeated exposure to proprioceptive disturbances is muscle specific[J]. *Gait?Posture*, 2010, 32(2):161-168.
- [27] Grob K. R., Kuster M. S., Higgins S. A., et al. Lack of correlation between different measurements of proprioception in the knee[J]. *J. Bone Joint Surg. Br.*, 2002, 84



- (4):614-618.
- [28] 李玉周,胡英琪,李国平.本体感觉测试的敏感性角度指标选取研究[J].中国运动医学杂志,2013,32(8): 696-701.
- [29] Aydog S. T., Korkusuz P., Doral M. N., et al. Decrease in the numbers of mechanoreceptors in rabbit ACL: the effects of ageing[J]. *Knee Surg. Sports Traumatol Arthrosc.*, 2006, 14(4):325-329.
- [30] Wingert J. R., Welder C., Foo P. Age-related hip proprioception declines: effects on postural sway and dynamic balance[J]. *Arch Phys. Med. Rehabil.*, 2014, 95(2): 253-261.
- [31] Kalisch T., Kattenstroth J. C., Kowalewski R., et al. Age-related changes in the joint position sense of the human hand[J]. *Clin. Interv. Aging*, 2012, 7:499-507.
- [32] Safran M. R., Borsari P. A., Lephart S. M., et al. Shoulder proprioception in baseball pitchers[J]. *J. Shoulder Elbow Surg.*, 2001, 10(5): 438-444.
- [33] 张秋霞,张林,王国祥.局部肌肉疲劳对踝关节本体感觉的影响[J].体育科学,2011, 31(3):68-73.
- [34] Walsh L. D., Hesse C. W., Morgan D. L., et al. Human forearm position sense after fatigue of elbow flexor muscles[J]. *J. Physiol.*, 2004, 558(2):705-715.
- [35] Rahnama N., Reilly T., Lees A. Injury risk associated with playing actions during competitive soccer[J]. *Br. J. Sports Med.*, 2002, 36(5):354-359.
- [36] Fong S. M., Tsang W. N., Ng Y. F. Lower limb joint sense, muscle strength and postural stability in adolescent Taekwondo practitioners: original research article[J]. *Int. Sport Med. J.*, 2013, 14(2):44-52.
- [37] Li J. X., Xu D. Q., Hoshizaki B. Proprioception of foot and ankle complex in young regular practitioners of ice hockey, ballet dancing and running[J]. *Res. Sports Med.*, 2009, 17(4):205-216.
- [38] Bańkosz Z., Szumielewicz P. Proprioceptive Ability of Fencing and Table Tennis Practitioners[J]. *Hum. Mov.*, 2014, 15(3):128-133.
- [39] Marmeleira J. F., Pereira C., Cruz-Ferreira A., et al. Creative dance can enhance proprioception in older adults [J]. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 2009, 49(4):480-485.
- [40] Waddington G., Seward H., Wrigley T., et al. Comparing wobble board and jump-landing training effects on knee and ankle movement discrimination[J]. *J. Sci. Med. Sport*, 2000, 3(4):449-459.
- [41] Han J., Waddington G., Anson J., et al. Does elastic resistance affect finger pinch discrimination?[J]. *Hum. Factors*, 2013, 55(5):976-984.
- [42] Panics G., Tallay A., Pavlik A., et al. Effect of proprioception training on knee joint position sense in female team handball players[J]. *Br. J. Sports Med.*, 2008, 42(6):472-476.
- [43] Aman J. E., Elangovan N., Yeh I. L., et al. The effectiveness of proprioceptive training for improving motor function: a systematic review[J]. *Front Hum. Neurosci.*, 2015, 8:1075.
- [44] Ju Y. Y., Liu Y. C., Cheng Y. K., et al. Rapid repetitive passive movement improves knee proprioception[J]. *Clin. Biomech.*, 2011, 26(2):188-193.
- [45] Wong J. D., Kistemaker D. A., Chin A., et al. Can proprioceptive training improve motor learning?[J]. *J. Neurophysiol.*, 2012, 108(12):3313-3321.
- [46] Cuppone A. V., Squeri V., Semprini M., et al. Robot-assisted proprioceptive training with added vibro-tactile feedback enhances somatosensory and motor performance [J]. *PLoS one*, 2016, 11(10):e0164511.
- [47] 任满迎,闫琪,刘颖.不同频率全身振动刺激对运动员下肢肌群力量训练效果的对比研究[J].体育科学,2008, 28(12):39-44.
- [48] Arai M., Shimizu H., Shimizu M. E., et al. Effects of the use of cross-education to the affected side through various resistive exercises of the sound side and settings of the length of the affected muscles[J]. *Hiroshima J. Med. Sci.*, 2001, 50(3):65-73.
- [49] Kofotolis N., Vrabas I. S., Vamvakoudis E., et al. Proprioceptive neuromuscular facilitation training induced alterations in muscle fibre type and cross sectional area [J]. *Br. J. Sports Med.*, 2005, 39(3): e11.
- [50] Funk D. C., Swank A. M., Mikla B. M., et al. Impact of prior exercise on hamstring flexibility: a comparison of proprioceptive neuromuscular facilitation and static stretching[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2003, 17(3):489-492.
- [51] Rees S. S., Murphy A. J., Watsford M. L., et al. Effects of proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on stiffness and force-producing characteristics of the ankle in active women[J]. *J. Strength Cond. Res.*, 2007, 21(2): 572-577.
- [52] Chmielewski T. L., Hurd W. J., Snyder-Mackler L. Elucidation of a potentially destabilizing control strategy in ACL deficient non-copers[J]. *J. Electromyogr Kinesiol.*, 2005, 15(1):83-92.
- [53] Fitzgerald G. K., Axe M. J., Snyder-Mackler L. The efficacy of perturbation training in nonoperative anterior cruciate ligament rehabilitation programs for physically active individuals[J]. *Phys. Ther.*, 2000, 80(2):128-140.

(责任编辑:何聪)